

**PCT**  
WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM  
Internationales Büro  
INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE  
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)



<p>(51) Internationale Patentklassifikation <sup>6</sup> : <b>H01J 37/28, 37/244</b></p>	<b>A1</b>	<p>(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: <b>WO 99/46797</b></p> <p>(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 16. September 1999 (16.09.99)</p>
<p>(21) Internationales Aktenzeichen: <b>PCT/EP99/01544</b></p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: 10. März 1999 (10.03.99)</p> <p>(30) Prioritätsdaten:              198 10 301.8      10. März 1998 (10.03.98)    DE              198 45 329.9      1. Oktober 1998 (01.10.98)    DE</p> <p>(71)(72) Anmelder und Erfinder: <b>ESSERS, Erik [DE/DE]; Lachnerstrasse 6, D-76131 Karlsruhe (DE).</b></p> <p>(74) Anwalt: <b>HERTZ, Oliver, v. Bezold &amp; Sozien, Briemmer Strasse 52, D-80333 München (DE).</b></p>		<p>(81) Bestimmungsstaaten: <b>JP, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).</b></p> <p><b>Veröffentlicht</b>  <i>Mit internationalem Recherchenbericht.          Vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche zugelassenen Frist: Veröffentlichung wird wiederholt falls Änderungen eintreffen.</i></p>
<p>(54) Title: <b>SCANNING ELECTRON MICROSCOPE</b></p> <p>(54) Bezeichnung: <b>RASTERELEKTRONENMIKROSKOP</b></p> <p>(57) Abstract</p> <p>The invention relates to a scanning electron microscope, comprising an electron gun and a sampling chamber in which one or several pressure stage diaphragms are arranged, through which a primary electron beam can be directed to a sample in the sampling chamber. The lowest pressure stage diaphragm (18) closest to the sample, through which the primary electron beam hits the sample, is designed to shield off increased pressure in the sampling chamber in relation to the remaining microscope column of the scanning electron microscope and to allow the passage of secondary electrons through its orifice from the sample to at least one detector. The detector is a highly sensitive detector (74) which is positively prestressed in relation to the sample. At least one electrode (44, 55) can be mounted above the lowest pressure stage diaphragm (18), on which a positive potential is applied in relation to the pressure stage diaphragm (18) and which is designed to direct the secondary electrons from the sample to the detector (74). Alternatively, the scanning electron microscope is designed to detect the secondary electron through the orifice of at least one pressure stage diaphragm which has a layered structure consisting of at least two conductive, electrically insulated layers that may be impinged upon by potentials.</p>		

## Rasterelektronenmikroskop

### Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Rasterelektronenmikroskop (REM), insbesondere ein unter etwas erhöhtem Druck arbeitendes Rasterelektronenmikroskop oder die Umrüstung eines unter Vakuum betriebenen Rasterelektronenmikroskops für den Betrieb mit Gas in der Probenkammer, und bezieht sich insbesondere auf eine verbesserte Detektionseffizienz eines derartigen Mikroskops (d.h. auf die Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnis der damit aufgenommenen Bilder), insbesondere beim Betrieb mit niedriger Primärenergie.

Bei einem Rasterelektronenmikroskop, das unter etwas erhöhtem Druck arbeitet (Druck-REM), ist in der Probenkammer üblicherweise ein maximaler Betriebsdruck von einigen Hektopascal bis einigen Kilopascal zugelassen. Die Primärelektronen haben bei diesem Druck nur eine kurze mittlere freie Weglänge. Deshalb wird die Mikroskopsäule zur Probenkammer hin durch eine Druckstufenblende (oder druckbegrenzende Blende) abgeschlossen, durch die der Primärelektronenstrahl in die Probenkammer eintritt. Oberhalb dieser Druckstufenblende ist der Druck um mehrere Zehnerpotenzen verringert.

Mit einer Szintillator-Lichtleiter-Kombination, die zwischen der Probe und der Druckstufenblende angeordnet ist, können die von der Probe emittierten Rückstreuielektronen detektiert werden. Eine demgegenüber verbesserte Ortsauflösung erhält man bei der Verwendung der von der Probe emittierten Sekundärelektronen, die mit Hilfe einer Kollektorelektrode detektiert werden können (WO 88/09564 A1). Dabei ist üblicherweise die Unterseite der Druckstufenblende als Kollektorelektrode ausgebildet oder eine separate Kollektorelektrode unterhalb der Druckstufenblende angeordnet.

Bei anderen Rasterelektronenmikroskopen, die unter etwas erhöhtem Druck arbeiten, findet die Detektion der Sekundärelektronen durch die Öffnung der Druckstufenblende hindurch in einer Art Vorkammer statt, die nach oben zur Objektlinse hin durch eine weitere Druckstufenblende abgeschlossen ist. Als Detektor für die Sekundärelektronen wird auch hier eine Kollektorelektrode verwendet (WO 90/04261 A1). Diese Gestaltung wurde zwar erprobt (G. D. Danilatos, „Design and Construction of an Environmental SEM; Part 4“, Scanning Vol.12 (1990), S. 23), hat sich jedoch in der praktischen Anwendung nicht durchgesetzt.

Detektorsysteme mit Kollektorelektroden haben wegen des Rauschens bei der nachfolgenden elektronischen Verstärkung eine schlechte Nachweisempfindlichkeit und erfordern deshalb eine Vorverstärkung des Sekundärelektronensignals vor dem Erreichen der Kollektorelektrode. Diese

auch durch die Zeitkonstante des Operationsverstärkers sind die heutigen Druck-REMs außerdem für geringe Strahlstromstärken nicht gut geeignet. Insbesondere bei der Untersuchung feuchter Proben bei hoher Vergrößerung wären eine geringere Strahlstromstärke und eine geringere Primärenergie jedoch wichtig, um eine lokale Erwärmung und das damit verbundene Austrocknen der betrachteten Probenstelle zu vermeiden.

Weiterhin besteht der Bedarf nach einem Druck-REM mit gutem Signal-zu-Rausch-Verhältnis, das auch für niedrige Primärenergie geeignet ist, auch, um feine Oberflächenstrukturen leichter Elemente besser wiedergeben zu können und den Kanteneffekt zu vermeiden.

Die Aufladungsbekämpfung beim Betrieb mit niedriger Primärenergie stellt eine weitere wichtige Aufgabe dar, die von den heutigen Druck-REMs wegen des dabei erhaltenen schlechten Signal-zu-Rausch-Verhältnis nicht zufriedenstellend gelöst wird. Anwendungsmöglichkeiten für entsprechende Druck-REMs bestehen beispielsweise in der Abbildung empfindlicher Kunststoffstoffe, in der Elektronenstrahlolithographie und bei Metrologiegeräten, wie sie beispielsweise in der Halbleiterindustrie zur automatisierten Überwachung in der Produktion verwendet werden. Statt dessen wird heute in anderen Metrologiegeräten der Einfluß der Aufladungen verringert, indem Rückstreu-elektronen für die Abbildung verwendet werden.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes, unter etwas erhöhtem Druck arbeitendes REM (im folgenden: Druck-Rasterelektronenmikroskop oder Druck-REM) anzugeben, das die genannten Nachteile herkömmlicher Druck-REMs nicht aufweist, und insbesondere die Detektionseffizienz von Druck-REMs, bei denen die Detektion durch die Druckstufenblende stattfindet, durch die die Mikroskopsäule zur Probenkammer hin abgeschlossen ist (bzw. das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der damit aufgenommenen Bilder), insbesondere beim Betrieb mit niedriger Primärenergie zu verbessern.

Diese Aufgabe wird durch ein REM mit den Merkmalen gemäß Patentanspruch 1 und/oder Patentanspruch 3 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Der Erfindung liegt allgemein die Idee zugrunde, ein Rasterelektronenmikroskop mit den Merkmalen gemäß dem Oberbegriff von Patentanspruch 1 so weiterzubilden, daß als Detektor ein hochempfindlicher, gegenüber der Probe positiv vorgespannter Detektor verwendet wird.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe insbesondere gemäß einem ersten Gesichtspunkt ferner insbesondere dadurch gelöst, daß oberhalb der Druckstufenblende ein oder mehrere Elektrodenelemente (massive Elektroden oder dünne Elektrodenschichten) angeordnet sind, die gegenüber der Druckstufenblende auf positivem Potential liegen, wobei als Detektor für die in der Probe und im Gas erzeugten Sekundärelektronen keine Kollektorelektrode, sondern ein oder mehrere Detektoren mit höherer Nachweisempfindlichkeit verwendet werden.

des Anteils der Sekundärelektronen, die durch die Druckstufenblenden hindurch gelangen. Dieser Anteil kann vergrößert werden, indem mindestens eine Druckstufenblende schichtweise aufgebaut wird aus zwei oder mehr leitfähigen Schichten mit dazwischenliegenden, schlecht leitenden oder isolierenden Schichten, so daß die Unterseite und die Oberseite der Druckstufenblende auf verschiedene Potentiale gelegt werden können. Dadurch wird in der Bohrung der Druckstufenblende ein elektrisches Feld erzeugt, das den Transport der Sekundärelektronen verbessert.

Die oben genannten ersten und zweiten Gesichtspunkte der Erfindung können einzeln oder gemeinsam implementiert werden, um die oben aufgeführte Aufgabe zu lösen. In beiden Fällen wird die Beschleunigung von Sekundärelektronen aus einem probennahen Bereich mit erhöhtem Druck hin zum Detektor in einen probenfernen Bereich mit reduziertem Druck (Vakuum) unterstützt.

Bei den üblichen Sekundärelektronendetektoren mit hoher Nachweisempfindlichkeit löst jedes einzelne Sekundärelektron eine große Anzahl Photonen, Elektronen oder Elektron-Loch-Paare aus, die dann detektiert werden. Hierzu ist es erforderlich, daß den Sekundärelektronen vor dem Erreichen des Detektors oder (bei Channelplate und Channeltron) entlang der Detektoroberfläche Energie zugeführt wird. Zu diesem Zweck muß zwischen der Probe und dem Detektor bzw. (bei Channelplate und Channeltron) entlang der Detektoroberfläche eine große elektrische Spannung angelegt werden.

Eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung besteht deshalb darin, daß die gesamte Detektoroberfläche oder Teile der Detektoroberfläche auf einem Potential liegen, das gegenüber dem Potential der Probe um mehr als 500 V, vorzugsweise 1000 V positiv ist. Die Verwendung solcher Detektoren in der Probenkammer eines herkömmlichen Druck-REMs würde zu Überschlagen führen.

Eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung besteht darin, daß das Druck-REM eine kombinierte elektrostatische und magnetische Objektivlinse besitzt. Gegenüber der einfacher herstellbaren rein elektrostatischen Objektivlinse (DE 3703029 A1) ist dies insbesondere dann von Vorteil, wenn das so ausgestaltete Druck-REM auch beiden üblichen Primärenergien oberhalb von 3 keV eingesetzt werden soll. Verglichen mit einer rein magnetischen Objektivlinse, ist eine kombinierte elektrostatische und magnetische Objektivlinse insbesondere dann von Vorteil, wenn die Sekundärelektronen durch ein elektrisches Feld auf die Öffnung einer Druckstufenblende fokussiert werden sollen. Insbesondere für die Untersuchung nichtmagnetischer Proben ergeben Ausführungsformen mit einer magnetischen Einpollinse (beispielsweise entsprechend den Objektivlinsen in EP 0790634 A1, DE 4236273 A1, EP 0767482A2 und EP 0817235 A1) eine besonders gute Auflösung und eine besonders gute Detektionseffizienz als wichtige Vorteile.

Die verbesserte Detektionseffizienz kommt durch eine Vergrößerung des Anteils der in der Probe und im Gas erzeugten Sekundärelektronen zustande, die durch die Druckstufenblenden hin-

sterelektronenmikroskops. zu denen beispielsweise Gehäusewände, Vakuumpumpen, Vakuumleitungen, die Kathode, die Elektroden zur Strahlformung, die Kondensorlinse, die Aperturblende, die Stigmatoren, die Alignment-Spulen und Steuereinrichtungen zählen, sind nicht dargestellt. So zeigt insbesondere Fig. 1 für ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Druck-REMs die für das Verständnis der Erfindung wesentlichen Bestandteile.

Der Primärelektronenstrahl gelangt längs der optischen Achse 79 von oben durch die Öffnung 77 des Detektors 74. Die zum Abrastern der Probe 11 erforderliche Ablenkung des Primärelektronenstrahles wird mit Hilfe der Ablenkspulen 59 erzeugt. Die Fokussierung des Primärelektronenstrahles geschieht mit Hilfe der von den Elektroden 44, 50 und 55 gebildeten elektrostatischen Linse und des von der magnetischen Linse 62 und/oder von der magnetischen Einpollinse 64 erzeugten Magnetfeldes. Einen weiteren Beitrag zur Fokussierung des Primärelektronenstrahles liefert das elektrische Feld zwischen der Elektrode 44 und der Elektrode 18. Es ist auch möglich, die magnetische Linse 62 mit zur optischen Achse hin geöffnetem Polschuhspalt oder die magnetische Einpollinse 64 wegzulassen.

Die Elektrode 55 liegt gegenüber den Elektroden 44 und 50 auf stark positivem Potential. Die Potentialdifferenz beträgt bevorzugt 1 bis 15 kV und kann beispielsweise 7 keV betragen. Die Elektroden 50 und 44 sind über die Isolierung 56 am Polschuh 58 zentriert. Die Elektrode 44 liegt gegenüber der Elektrode 18 auf positivem Potential mit einer bevorzugten Potentialdifferenz von 50 bis 2000 V. Die Elektrode 18, die über die Isolierung 60 befestigt ist, liegt gegenüber der Probe 11 auf positivem oder auf demselben Potential. Die Größe der angelegten Spannungen wird weiter unten in Zusammenhang mit Fig. 2 besprochen.

Da die beiden Elektroden 18 und 44 eine elektrostatische Linse bilden, ist es für die Auflösung vorteilhaft, daß die kegelstumpfförmige Elektrode 18 während des Betriebes mit großer Genauigkeit in Bezug auf die optische Achse 79 zentriert werden kann. Eine geeignete Möglichkeit hierfür besteht beispielsweise in der Verwendung von Mikrometerschrauben und/oder geregelten Piezostellsystemen, deren Krafteinwirkungen  $F_x$  und  $F_y$  (in x- und y-Richtung) im dargestellten Ausführungsbeispiel die über den Umfang verteilten Rundstäbe 68 elastisch verformen. Die Elektrode 44 muß nicht so genau zentrierbar sein wie die Elektrode 18, da die Äquipotentialflächen des elektrischen Feldes im Bereich der Öffnung 41 der Elektrode 44 nahezu eben sind.

Die Elektroden 18 und 44 sind gleichzeitig als Druckstufenblenden ausgebildet. Durch die Öffnung der Druckstufenblende 18 strömt Gas aus der Probenkammer nach oben in die Mikroskopsäule, das durch den Wellschlauch 63 und durch die Öffnung der Elektrode 55 abgepumpt wird, wie es die Pfeile andeuten. Die Abdichtung der zentrierbaren Druckstufenblende 18 gegenüber dem äußeren Polschuh erfolgt durch den Simmerring 65.

Bei der in Fig. 1 dargestellten Ausführung können diejenigen Bauteile (18, 44, 50, 56, 60,

mer ein, durchquert das Gas in der Probenkammer und trifft auf die Probe 11, wo er Sekundärelektronen und Rückstreuielektronen erzeugt. Die Sekundärelektronen haben einen großen Wirkungsquerschnitt für elastische Streuung. Ihre Bewegungsrichtung wird deshalb, ähnlich wie bei einem Diffusionsvorgang, häufig umgelenkt und es besteht die Gefahr, daß sie von der Probe absorbiert werden. Die Sekundärelektronen werden deshalb mit Hilfe eines elektrischen Feldes zur Öffnung 16 gelenkt, das entweder nur aus dem Felddurchgriff durch die Öffnung 16 besteht oder durch das zusätzliche Anlegen einer Spannung zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 erzeugt wird.

In Abhängigkeit vom Gas und Druck in der Probenkammer, Durchmesser der Öffnung 16, Länge der Bohrungswandung 17, Kegelöffnungswinkel  $\beta$  und  $\gamma$  der inneren Kegelfläche 22 und Abstand zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 gibt es jeweils eine optimale Spannung zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18, für die die meisten Sekundärelektronen zum Detektor 74 gelangen. Diese Spannung kann zwischen null Volt und einigen hundert Volt liegen. Für kleine Abstände zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 kann der Felddurchgriff durch die Öffnung 16 der Druckstufenblende (in Abhängigkeit von den oben genannten Parametern) ausreichend groß sein, um die Sekundärelektronen zur Öffnung 16 zu lenken. Dann können die Probe 11 und die Druckstufenblende 18 auf demselben Potential liegen.

Das Anlegen einer Spannung zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 hat mehrere Auswirkungen: Es erzeugt ein stärkeres elektrisches Feld und verbessert dadurch den Transport der Sekundärelektronen nach oben zur Druckstufenblende 18. Gleichzeitig verringert es die Durchwölbung der Äquipotentialflächen nach unten innerhalb und direkt unterhalb der Öffnung 16, so daß die Sekundärelektronen in diesem Bereich weniger stark zur optischen Achse 79 hin gelenkt werden. Andererseits bewirkt es jedoch zusammen mit der kegelförmigen Elektrode 18, daß die Sekundärelektronen weiter unterhalb der Öffnung 16 zur optischen Achse 79 hin gelenkt werden.

Für eine nicht zu große Bohrungslänge der Öffnung 16 und kleine Abstände zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 (je nach Druck in der Probenkammer und Geometrie der Druckstufenblende 18 beispielsweise für Abstände bis zum doppelten Durchmesser der Öffnung 16) gelangt ein Großteil der Sekundärelektronen auch durch die Öffnung 16, wenn die Spannung zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 so groß gewählt wird, daß die Feldstärke nahe unterhalb der Öffnung 16 etwa gleich groß ist wie in der Öffnung 16. Hierdurch nehmen die Verzerrungen am Rand des Gesichtsfeldes ab, so daß das Gesichtsfeld vergrößert werden kann. Dies gilt insbesondere bei der Verwendung von Druckstufenblenden 18, deren innere Kegelfläche 22 einen großen Kegelöffnungswinkel  $\beta$  hat und bei denen die Länge der Bohrungswandung 17 klein ist im Verhältnis zum Durchmesser 16 der Öffnung. Eine andere Möglichkeit zur Vergrößerung des Ge-

(Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Öffnung der oberen Druckstufenblende 44 nicht wesentlich kleiner ist als die Öffnung der unteren Druckstufenblende 18 und die obere Druckstufenblende 44 unterhalb des Polschuhs 58 angebracht ist, wie es in den Figuren 1, 6, 7, 8, 9 und 10 dargestellt ist.) Da oberhalb der unteren Druckstufenblende keine starke Streuung mehr stattfindet, wird hierdurch erreicht, daß alle Sekundärelektronen, die durch die untere Druckstufenblende gelangen, auch durch die obere Druckstufenblende gelangen, sofern sie nicht durch die zunehmende magnetische Feldstärke zum Umkehren gezwungen werden. Letzteres trifft nur auf die Sekundärelektronen mit großen Winkeln gegenüber der optischen Achse zu. Durch Anlegen einer zusätzlichen Spannung zwischen den Elektroden 18 und 44 läßt es sich vollständig vermeiden.

Oberhalb der Öffnung 16 der unteren Druckstufenblende 18 in Fig. 2 nimmt der Druck bis zur Öffnung 41 der oberen Druckstufenblende 44 gegenüber dem Druck der Probenkammer um mehrere Zehnerpotenzen ab. Die Druckabnahme ist abhängig von der Größe der Öffnung 16 der unteren Druckstufenblende. Diese Druckabnahme nach oben hin bewirkt eine Zunahme der mittleren freien Weglänge der Sekundärelektronen.

Bei niedrigem Druck (beispielsweise 1 hPa) in der Probenkammer oder kleinem Durchmesser (beispielsweise 200 µm) der unteren Druckstufenblendenöffnung 16 oder wenn die Sekundärelektronen beim Erreichen der Öffnung 16 verhältnismäßig energiereich sind (beispielsweise 20 eV), ist kein zusätzliches elektrisches Feld oberhalb der Druckstufenblende 18 erforderlich, um die Sekundärelektronen durch die obere Druckstufenblendenöffnung 41 zu lenken, wenn das Magnetfeld der Einpollinse 64 vorhanden ist, um die Sekundärelektronen durch die obere Druckstufenblendenöffnung 41 zu lenken.

Falls die Einpollinse 64 nicht vorhanden oder nicht ausreichend stark aktiviert ist, werden die Sekundärelektronen in den Ausführungsbeispielen aus Fig. 2 bis 4 durch das elektrische Feld zwischen den beiden Druckstufenblenden auf die obere Druckstufenblendenöffnung 41 fokussiert, oberhalb der ein gutes Vakuum herrscht, in dem die Sekundärelektronen detektiert werden. Bei diesem Funktionsprinzip ist es erforderlich, daß die Sekundärelektronen keine Stöße mehr ausführen, wenn sie auf die Öffnung 41 der oberen Druckstufenblende fokussiert werden. Dies wird durch die Abnahme des Druckes und die Zunahme der elektrischen Feldstärke oberhalb der Öffnung der unteren Druckstufenblende 18 erreicht. Gleichzeitig mit der Zunahme der mittleren freien Weglänge der Sekundärelektronen nimmt auch die elektrische Feldstärke oberhalb der Öffnung 16 aufgrund der konischen Form der Elektrode 18 nach oben hin stark zu. Beides zusammen führt dazu, daß die Geschwindigkeit, die die Sekundärelektronen zwischen zwei Stößen erreichen, oberhalb der Öffnung 16 stark zunimmt. Da außerdem auch mit zunehmender Geschwindigkeit die mittlere freie Weglänge der Sekundärelektronen zunimmt, werden die Sekundärelektronen oberhalb der Öffnung 16 innerhalb ihrer freien Weglänge so schnell (und nimmt dabei ihre mittlere freie Weglänge so stark zu),

daß eine der Druckstufenblenden 18 oder 44 höhenverstellbar (d.h. in ihrer Lage entlang der optischen Achse verstellbar) ist. Eine weitere Möglichkeit zur Veränderung der Fokussierung ergibt sich bei der Verwendung einer nicht als Druckstufenblende wirkenden, zusätzlichen Elektrode mit größerem Öffnungsdurchmesser, die zwischen den Elektroden 18 und 44 angebracht und vorzugsweise über eine Isolierung an einer dieser beiden Elektroden befestigt und zentriert ist. Die Potentiale der Elektrode 18 und der zusätzlichen Elektrode können dann so verändert werden, daß die Äquipotentialflächen in der Öffnung 41 weiterhin eben bleiben, während die Fokussierung der Sekundärelektronen verändert wird. Die hier angesprochene einstellbare oder veränderliche Fokussierung der Elektronen ist insbesondere für große Druckstufenblendenöffnungen 16 wichtig.

Der weitere Weg der Sekundärelektronen oberhalb der Elektrode 44 wird im folgenden anhand von Fig. 1 erläutert. Die Sekundärelektronen werden durch das elektrische Feld zwischen den Elektroden 44 und 55 weiter beschleunigt und fliegen mit hoher kinetischer Energie zum Detektor 74. Durch die starke Abnahme des Gasdruckes innerhalb und oberhalb der Druckstufenblenden 18 und 44 wird erreicht, daß trotz des erhöhten Druckes in der Probenkammer am Ort des Detektors 74 ein hinreichend gutes Vakuum für den Einsatz von Detektoren mit hoher Nachweisempfindlichkeit vorhanden ist. Als Detektor 74 sind insbesondere Szintillator-Lichtleiter-Kombinationen, Channelplates und Halbleiterdetektoren mit einem Metall-Halbleiter-Übergang oder mit einem p-n-Übergang gut geeignet. Es können auch Szintillator-Photomultiplier-Kombinationen auf der Basis von Plastikszintillatoren YAG-Szintillatoren, YAP-Szintillatoren und dgl. verwendet werden. Bei Verwendung einer Channelplate ist es empfehlenswert, eine zusätzliche Liner-Elektrode für die Öffnung des Detektors vorzusehen, wie sie in DE 37030'29 A1 verwendet wird.

Fig. 3 zeigt für denselben Ausschnitt wie in Fig. 2 eine andere Variante eines erfindungsgemäßigen Druck-REMS zur Illustration des oben genannten zweiten Gesichtspunkts. Die obere Druckstufenblende in Fig. 3 ist schichtweise aufgebaut: Ihre Unterseite 39 und Oberseite 43 bestehen aus leitfähigen Materialien, während in ihrem Inneren zumindest eine Schicht aus isolierendem Material besteht. Die Kontaktierung der leitfähigen Schichten 39 und 43 liegt außerhalb des dargestellten Bereiches.

Die Potentiale der Elektroden 18, 39, und 43 werden so gewählt, daß in den Öffnungen der Elektroden 39 und 43 und im Bereich 41 zwischen den Öffnungen der beiden Elektroden dieselbe elektrische Feldstärke herrscht. Da die bevorzugte Dicke der Elektroden 39 und 43 in der Nähe der optischen Achse 79 sehr klein ( $\leq 100 \mu\text{m}$ ) ist, sind die Äquipotentialflächen im Bereich der Öffnungen der Elektroden 39 und 43 und im Bereich 41 dazwischen nahezu eben. Der bevorzugte Abstand zwischen den Elektroden 39 und 43 beträgt 10 bis 1000  $\mu\text{m}$ . Eine geeignete Möglichkeit zur Herstellung einer solchen, schichtweise aufgebauten Druckstufenblende mit sehr dünnen Elektroden 39 und 43 besteht beispielsweise darin, daß die Elektroden 39 und 43 Metallbeschichtungen eines Iso-



Wenn die Einpollinse 64 nicht in Betrieb ist, wird beim Vakuumbetrieb mit den in Fig. 2 bis Fig. 4 dargestellten Aufbauten nahe oberhalb der Öffnung 16 ein erster Sekundärelektronen-Crossover erhalten, der durch das elektrische Feld zwischen den Elektroden 18 und 44 (bzw. 39) auf die Öffnung 41 abgebildet wird. Die Fokussierung der Sekundärelektronen auf die Öffnung 41 wird dabei durch das Anlegen einer kleinen Spannung zwischen der Probe 11 und der Elektrode 18 und/oder durch eine der in Zusammenhang mit Fig. 2 beschriebenen Maßnahmen zur Veränderung der Fokussierung der Sekundärelektronen erreicht. Für den Vakuumbetrieb mit den in Fig. 2 bis 4 ausschnittsweise dargestellten Druck-REMs ist die Kombination mit einem zusätzlichen oberen Detektor 91 aus Fig. 8 oder Fig. 9 vorteilhaft.

Wenn die Einpollinse 64 nicht in Betrieb ist, müssen die Sekundärelektronen in den Ausführungsbeispielen aus Fig. 2 bis 4 auf die Öffnung 41 der oberen Druckstufenblende fokussiert werden. In Fig. 5 ist hingegen ein Ausführungsbeispiel dargestellt, bei dem die Sekundärelektronen auch ohne das Magnetfeld der Einpollinse nicht auf eine bestimmte Stelle fokussiert werden müssen und dementsprechend auch die für die Sekundärelektronen-Fokussierung maßgeblichen Parameter frei gewählt werden können. Ein weiterer Vorteil der in Fig. 5 dargestellten Ausführung besteht darin, daß auch ohne das Magnetfeld der Einpollinse 64 ein sehr großer Anteil der Sekundärelektronen zum Signal des Detektors beiträgt.

Der Weg des Primärelektronenstrahls durch die Öffnungen 41 und 16 zur Probe 11, die Spannung zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18, der Weg der Sekundärelektronen von der Probe 11 zur Öffnung 16 und durch die Öffnung 16 hindurch, die Größe der Öffnung 16, die Zunahme der elektrischen Feldstärke oberhalb der Öffnung 16 und die Druckabnahme oberhalb der Öffnung 16 sind dieselben wie in Fig. 2. Statt der dünnwandigen Druckstufenblende 44 in Fig. 2 wird in Fig. 5 jedoch das dickwandige Bauteil 42 verwendet. Seine bevorzugte Dicke (Länge des Durchgangs 41) beträgt 0,4 mm bis 6 mm. Es ist schichtweise aus isolierenden und leitfähigen Schichten aufgebaut, die senkrecht zur optischen Achse 79 verlaufen und in Fig. 5 durch die horizontale Schraffur des Bauteils 42 angedeutet sind. Die leitfähigen Schichten haben dabei eine bevorzugte Dicke von weniger als 200 µm, während die isolierenden Schichten auch dicker sein können. Das Bauteil 42 ist in die isolierende Halterung 40 eingepaßt, die das Bauteil 42 an der Bohrung der Elektrode 50 zentriert. Die Oberseite des Bauteils 42 ist von der leitfähigen Schicht 43 bedeckt, die eine Elektrode bildet, die auf demselben Potential wie die Elektrode 50 liegt. Die Unterseiten des Bauteils 42 und der Halterung 40 sind von der leitfähigen Schicht 39 bedeckt. Sie bildet eine Elektrode, die gegenüber der Elektrode 43 auf negativem Potential liegt. Das Bauteil 42 hat einen mittleren Durchgang 41 um die optische Achse 79 herum und zusätzlich noch mehrere Durchgänge 36 über den Umfang verteilt.

Die Oberfläche der Durchgänge 36 und 41 ist mit einer schlecht leitfähigen Schicht bedeckt.

Mit dem in Fig. 5 dargestellten Aufbau ist auch der Betrieb mit Vakuum oder sehr geringem Druck in der Probenkammer möglich. Wenn die untere Druckstufenblende 18 entfernt wird, wird hiermit auch bei großem Abstand ( $> 5$  mm) zwischen der Probe 11 und der Elektrode 25 eine gute Auflösung und eine gute Detektionseffizienz erreicht. Die Spannung zwischen den Elektroden 25 und 39 ist dabei so groß, daß die elektrische Feldstärke direkt unterhalb des Durchgangs 41 gleich groß ist wie innerhalb des Durchgangs 41. Ein sehr großes Gesichtsfeld erhält man hiermit bei Verwendung eines Doppelablenkelementes, wenn das Rasterzentrum nahe oberhalb oder in den Durchgang 41 gelegt wird.

Eine besonders vorteilhafte und bevorzugte Ausgestaltung des in Fig. 5 dargestellten Aufbaus besteht darin, daß das Bauteil 42 sehr nahe an der unteren Druckstufenblende 18 angeordnet wird (mit einem bevorzugten Abstand von weniger als 2 mm zur Druckstufenblende 18). Hierbei wird auf die Durchgänge 36 verzichtet und der Durchgang 41, das Bauteil 42, die Isolierung 40 und die leitfähige Schicht 39 verjüngen sich kegelförmig nach unten hin. Für nicht zu kleine Vergrößerungen ( $\geq$  ca. 1000-fach) ergibt diese Variante in Verbindung mit der Einpollinse 64 eine sehr gute Detektionseffizienz. Für kleine Vergrößerungen wird die Einpollinse 64 ausgeschaltet.

Die Ausführungsbeispiele aus Fig. 1, Fig. 3 und Fig. 5 sind mit einer kombinierten elektrostatischen und magnetischen Objektivlinse vorgesehen. Die in Fig. 2 und Fig. 4 dargestellten Ausführungsbeispiele sind sowohl in Verbindung mit einer kombinierten elektrostatischen und magnetischen Objektivlinse, als auch mit einer rein magnetischen Objektivlinse, die ein Magnetfeld zwischen den Druckstufenblenden erzeugt (beispielsweise einer Einpollinse), funktionstüchtig. Im Fall einer rein magnetischen Objektivlinse, kann die Spannung zwischen den Druckstufenblenden 18 und 44 geringer sein als bei einer kombinierten elektrostatischen und magnetischen Objektivlinse oder beide Druckstufenblenden können sogar auf demselben Potential liegen. Durch die geringere elektrische Feldstärke im Bereich der oberen Druckstufenblende 44 entfällt auch die Notwendigkeit einer besonders dünnen Druckstufenblende 44, sondern es können beispielsweise auch handelsübliche Aperturblende als Druckstufenblende verwendet werden.

Fig. 6 und Fig. 7 zeigen Ausführungsbeispiele mit rein magnetischer Objektivlinse. In Fig. 6 ist ein Ausschnitt aus einer Objektivlinse zu sehen, wie sie an sich aus EP 0767482 (Fig. 1) bekannt ist. Diese Objektivlinse kann sowohl mit der Linse 62 mit axialem Polschuhspalt, als auch mit der außerhalb des in Fig. 6 dargestellten Bereiches liegenden Einpollinse betrieben werden, deren innerer Polschuh 58 bis nahe zur Probe reicht. Beim Betrieb mit der Einpollinse findet die Detektion in Fig. 6 in dem Bereich zwischen dem Polschuh 58 und der Linse 62 statt, der gegenüber den Magnetfeldern der beiden Objektivlinsen abgeschirmt ist. Dabei wird das Signal mit Hilfe eines Lichtleiters durch eine Bohrung im Polschuh 58 weitergeleitet, um außerhalb des dargestellten Bereiches von einem Photomultiplier verstärkt zu werden. Wenn die Einpollinse nicht in Betrieb ist, ist mit dem in

beispielsweise 250  $\mu\text{m}$  als Druckstufenblendenöffnungsdurchmesser und als Abstand zwischen der Probe und der Druckstufenblende ist beispielsweise eine Spannung von wenigen Volt ausreichend für den Transport der Sekundärelektronen zur unteren Druckstufenblendenöffnung. Für die oben angesprochene Abwandlung des in Fig. 6 dargestellten Ausführungsbeispiels, bei der die obere Druckstufenblende 44 auf positivem Potential gegenüber der unteren Druckstufenblende 18 liegt, findet auch bei dieser geringen Spannung zwischen der Probe und der Druckstufenblende ein effektiver Weitertransport der Sekundärelektronen oberhalb der unteren Druckstufenblende 18 statt. Für das in Fig. 6 dargestellte Ausführungsbeispiel, ohne elektrisches Feld im Bereich innerhalb und oberhalb der unteren Druckstufenblendenöffnung, haben die dort ankommenden Sekundärelektronen mit einer Energie von wenigen Elektronenvolt jedoch eine nur schwach vorwärts gerichtete Winkelverteilung ihrer Bewegungsrichtung und führen elastische Stöße mit verhältnismäßig großen mittleren Streuwinkeln aus. Eine geringere Streuwahrscheinlichkeit, einen geringeren mittleren Streuwinkel und eine stärker vorwärts gerichtete Winkelverteilung der Bewegungsrichtung erhält man hingegen, wenn man beispielsweise eine Spannung von 20 Volt anlegt. Wesentlich höhere Spannungen bis zu mehreren hundert Volt können je nach Probenkipfung und Vergrößerung ebenfalls vorteilhaft sein, weil unter den Bedingungen des obigen Beispiels dann eine schwache Sekundärelektronenkaskade entstehen würde. Der Verstärkungsfaktor wäre im Zusammenhang mit einer Kollektorelektrode oder einem Gasszintillationsdetektor zwar völlig ungenügend, stellt im Zusammenhang mit dem hochempfindlichen Detektor 51 jedoch einen zusätzlichen Gewinn dar, der den durch die breitere Energieverteilung etwas verringerten Anteil der Sekundärelektronen, die den Detektor 51 erreichen, je nach Aufbau des Detektors, durchaus überkompensieren kann.

Das durch die Öffnung 16 aus der Probenkammer einströmende Gas wird durch die seitliche Öffnungen 20 und das Rohr 31 abgepumpt. Wie in Fig. 2 findet auch in Fig. 6 eine starke Druckabnahme oberhalb der Öffnung 16 und eine Zunahme der mittleren freien Weglänge der Sekundärelektronen statt, so daß viele Sekundärelektronen ihren letzten Stoß in geringer Entfernung oberhalb der Öffnung 16 haben. Beim Betrieb mit angeregter Einpollinse werden die Sekundärelektronen auf Spiralbahnen gezwungen, auf denen sie durch die obere Druckstufenblendenöffnung 41 gelangen.

Die bevorzugte Größe der Öffnungen der Druckstufenblenden 18 und 44 ist abhängig vom gewünschten maximal zulässigen Druck in der Probenkammer, von der gewünschten kleinsten verwendbaren Primärenergie und von der Güte des Vakuums, das die Kathode benötigt. Es ist möglich, oberhalb der Druckstufenblende 44 weitere Druckstufenblenden einzufügen und die entstehenden Zwischenräume zu evakuieren. Die bevorzugten Durchmesser der Öffnungen der Druckstufenblenden 18 und 44 sind dieselben wie in Fig. 2, wobei die Öffnung 41 aber auch kleiner sein kann als die Öffnung der unteren Druckstufenblende 18. Denn die durch die Einpollinse erzeugte magnetische Flußdichte ist in der oberen Druckstufenblendenöffnung 41 wesentlich größer (und der Larmorradi-

Zylinderspulen, die auch in mehr als zwei Teile aufgeteilt sein können, und anschließend durch die in aus elektronenoptischen Gründen sowieso vorgesehenen zusätzlichen Bohrungen 38 abgepumpt. Das Rohr 32, durch das dabei abgepumpt wird, mündet in ein Bauteil, das gegenüber dem Polschuh durch die Dichtung 33 abgedichtet ist.

Eine starke konstruktive Vereinfachung in Fig. 6 kann erreicht werden, indem das Bauteil 25, das Rohr 31, die untere Druckstufenblende 18 und der dadurch überflüssigwerdende Teil des Bauteils 19 weggelassen werden. Bei gleichem Druck in der Probenkammer ist dann allerdings nur ein Betrieb mit sehr viel kleinerer Druckstufenblendenöffnung 41 möglich.

Zur Durchführung von energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) mit den Ausführungsbeispielen aus Fig. 6 (oder seiner oben genannten Abwandlung mit einer zusätzlichen Spannung zwischen den beiden Druckstufenblenden) und Fig. 7 ist in der Probenkammer außerhalb des dargestellten Bereiches in Richtung des mit "EDX" beschrifteten Pfeils ein EDX-Detektor angebracht. In Fig. 1 ist dies ebenfalls möglich. In Fig. 6 wird dabei bevorzugt ein Vorsatz 26 ohne Kollektorelektrode 13 verwendet, um die EDX-Detektion bei einem kleinen Abstand zwischen der Druckstufenblende 18 und der Probe 11 zu ermöglichen.

Der Abstand zwischen der Druckstufenblende 18 und der Probe 11 ist für EDX bevorzugt größer als der Durchmesser der Öffnung der Druckstufenblende 18 und kleiner als 1,5 Millimeter. Zwischen der Druckstufenblende und der Probe liegt eine Spannung von bevorzugt 50 bis mehreren 100 Volt, beispielsweise von 300 Volt an. Der Gasdruck in der Probenkammer wird so hoch gewählt, daß Aufladungen durch die von den beschleunigten Sekundärelektronen erzeugten Gasionen ausgeglichen werden. Die Verwendung eines kleinen Abstandes zwischen der Probe und der Druckstufenblende und eines dementsprechend höheren Gasdruckes hat dabei den Vorteil, daß die Gasionen die Probe wesentlich gezielter dort erreichen, wo die Aufladungen erzeugt werden. Sie vergrößert also die Effizienz der Aufladungsbekämpfung durch die Gasionen, indem ein größerer Prozentsatz der Gasionen die Probe in dem kleinen, betrachteten Bereich erreicht. Dadurch wird es möglich, das Produkt  $p \cdot d$  (Druck mal Wegstrecke der Primärelektronen durch das Gas) zu verringern und dementsprechend mit verringerter Primärelektronenstreuung zu arbeiten. Außerdem treffen die gestreuten Primärelektronen mit einem geringeren Abstand von der momentan analysierten Probenstelle auf die Probe. Wenn die Einpollinse in Betrieb ist, können simultan zur Aufnahme von EDX-Spektren auch Sekundärelektronenbilder der Probe mit dem hochempfindlichen Detektor 51 aufgenommen werden. Im Gegensatz zu den heute bekannten Detektoren für erhöhten Druck in der Probenkammer eignet er sich besonders gut für den bei EDX vorteilhaften kurzen Abstand zwischen der Probe und der Druckstufenblende. Durch die verringerte Primärelektronenstreuung und das damit verbundene verringerte Signal von umliegenden Probenstellen wird die Nachweisempfindlichkeit in den EDX-Spektren stark verbessert. Wahlweise kann auch die Primärenergie verringert und

Fig. 7 zeigt ein anderes Ausführungsbeispiel für ein erfindungsgemäßes Druck-REM mit ausschließlich magnetischer Objektivlinse, die in diesem Fall lediglich aus der Einpollinse 64 besteht. Der Weg der Primärelektronen zur Probe, die Fokussierung der Primärelektronenstrahls durch die Einpollinse 64, die bevorzugte Größe der Öffnungen der Druckstufenblenden 18 und 44, und die bevorzugte Spannung zwischen der Probe 11 und der unteren Druckstufenblende 18 sind dieselben wie bei Fig. 6. Für die Spannung zwischen der Probe und der unteren Druckstufenblende ist allerdings zu beachten, daß Fig. 7 der Abwandlung von Fig. 6 entspricht, bei der die obere Druckstufenblende 44 auf einem positiven Potential gegenüber der unteren Druckstufenblende 18 liegt. Bei dem in Fig. 7 dargestellten Ausführungsbeispiel hat eine geringe Spannung von wenigen Volt zwischen der Probe und der unteren Druckstufenblende den Vorteil, daß die Sekundärelektronen nur eine geringe Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur optischen Achse haben. Dies verbessert die Detektionseffizienz bei der späteren Detektion. Außerdem haben die Sekundärelektronen mit einer Energie von nur wenigen Elektronenvolt auch einen sehr geringen Larmorradius, haben jedoch einen größeren mittleren Streuwinkel als bei höherer Energie. Ob der positive oder der negative Effekt überwiegt ist abhängig vom Abstand zwischen der Probe und der Druckstufenblende, vom Gasdruck, von der Primärenergie und vom Durchmesser der Druckstufenblendenöffnung 16.

Es könnten auch in Fig. 7 beide Druckstufenblenden auf dasselbe Potential gelegt werden. Dies hätte den Vorteil, daß sie besonders einfach als ein gemeinsamer Einsatz ausgeführt werden könnten, hätte jedoch den Nachteil einer verringerten Detektionseffizienz im Vergleich zum dargestellten Aufbau. Die bevorzugte Potentialdifferenz zwischen den beiden Druckstufenblenden 18 und 44 in Fig. 7 beträgt zwischen 5 V und 500 V. In Abhängigkeit von der Anregung der Einpollinse, dem Verlauf des magnetischen Feldes und der Spannung zwischen der Probe 11 und der unteren Druckstufenblende 18 gibt es für die Spannung zwischen den beiden Druckstufenblenden 18 und 44 einen Spannungsgrenzwert, ab dem keine Sekundärelektronen mehr durch die nach oben hin zunehmende magnetische Flußdichte zum Umkehren gezwungen werden, sondern nahezu alle Sekundärelektronen, die durch die untere Druckstufenblendenöffnung 16 gekommen sind, auch durch die obere Druckstufenblendenöffnung 41 gelangen. Neben diesem Spannungsgrenzwert ist aber auch die den Sekundärelektronen zugeführte Energie ein wichtiger Gesichtspunkt für die Wahl der Spannung zwischen den Druckstufenblenden. Die Spannung zwischen der unteren und der oberen Druckstufenblende wird so groß gewählt, daß die Energie der Sekundärelektronen oberhalb der oberen Druckstufenblende 44 mindestens so groß ist wie die Mindestenergie, die erforderlich ist, um den dort divergierenden magnetischen Feldlinien nicht zu folgen, sondern nach oben in Richtung zum Detektor zu fliegen. Durch die Gegenelektrode 78, die auf dem mittleren Potential der beiden Elektroden 75 und 81 liegt, können die Sekundärelektronen anschließend wieder abgebremst werden.

Der Detektor 51 mit seinem starken Saugfeld befindet sich hinter der Gitterelektrode 75. Die

für die Detektionseffizienz unkritisch. Falls diese Feldkrümmung innerhalb der unteren Druckstufenblendenöffnung 16 aber doch unterdrückt werden soll, ist dies mit einer Hilfselektrode 13, wie sie in Fig. 4 und Fig. 6 dargestellt ist, leicht möglich. Indem die Hilfselektrode 13 auf ein positives Potential gegenüber der unteren Druckstufenblende 18 gelegt wird, kann die elektrische Feldstärke innerhalb der unteren Druckstufenblendenöffnung 16 so gering gemacht werden, daß sie nicht mehr stört. Der dabei entstehende Bereich mit niedriger elektrischer Feldstärke vor der Druckstufenblendenöffnung 16 verringert außerdem die mittlere Sekundärelektronenenergie, was positiv für die Detektion ist. Der Verstärkungsfaktor der Sekundärelektronenkaskade wird allerdings etwas abgeschwächt.

Nachdem die Sekundärelektronen in Fig. 7 durch die Gitterelektrode 75 gelenkt wurden, werden sie wie in Fig. 6 vom Saugfeld des Detektors 51 erfaßt, dessen bevorzugte Spannung zwischen 1 und 20 kV liegt.

Es ist von Vorteil, daß die Druckstufenblende 44 in Fig. 6 und Fig. 7 leicht auswechselbar ist, so daß sie leicht ersetzt werden kann. Außerdem ist es vorteilhaft, daß innerhalb der oberen Druckstufenblendenöffnung 41 eine hohe magnetische Flußdichte herrscht und die Öffnung 41 bevorzugt so groß ist, daß nicht nur alle Sekundärelektronen, sondern auch die meisten Rückstreuungselektronen, die nicht durch die untere Druckstufenblende 18 abgeschattet werden, durch die Öffnung 41 hindurchgelangen. Eine andere bevorzugte Abwandlung der Ausführungsbeispiele aus Fig. 6 und Fig. 7, die einen besonders großen Durchmesser der unteren Druckstufenblendenöffnung 16 erlaubt, besteht darin, daß die obere Druckstufenblendenöffnung 41 gleichgroß oder kleiner ist als die untere Druckstufenblendenöffnung 16. Nahe unterhalb der oberen Druckstufenblende 44 ist (mit beispielsweise 100 µm, höchstens aber 1 mm Abstand) eine zusätzliche Blende angebracht, deren Öffnungsdurchmesser größer oder gleichgroß ist wie der Öffnungsdurchmesser der oberen Druckstufenblende 44. Der Zwischenraum zwischen den beiden Blenden ist mit einer regelbaren Gaszufuhr verbunden, durch die beispielsweise Ozon einströmt. Der Partialdruck des Ozons am Ort der Druckstufenblendenöffnung 41 unterscheidet sich vom dortigen Partialdruck des Wasserdampfes beim Betrieb mit maximal erlaubtem Gasdruck in der Probenkammer um einen Faktor von weniger als 100, bevorzugt um einen Faktor von weniger als 20. Falls es wünschenswert ist, kann die obere Druckstufenblende 44 bei diesem Ausführungsbeispiel gleichzeitig auch als Aperturblende verwendet werden.

Die Halterung 19 der oberen Druckstufenblende ist in Fig. 7 leicht demontierbar an der Elektrode 67 befestigt, über die die Druckstufenblende 44 auch kontaktiert ist. Die untere Druckstufenblende 18 ist leicht demontierbar am Polschuh 58 befestigt. Der Zwischenraum zwischen den beiden Druckstufenblenden wird mit Hilfe eines Wellschlauches 63 evakuiert, der beispielsweise leicht demontierbar in der Probenkammer angeflanscht sein kann. Der Wellschlauch 63 behindert die Probenkipparbeit nur in eine Richtung, so daß die Probe in alle Richtungen gekippt werden

turbulente 94 kombinierten oberen Detektor 91 besteht eine bevorzugte Ausführungsform darin, daß oberhalb der Aperturblenze 94 Ultrahochvakuum herrscht, damit die Aperturblenze nicht beheizt zu werden braucht.

In Fig. 9 wird der von der Kathode 99 emittierte Primärelektronenstrahl mit Hilfe eines elektromagnetischen Aperturblenzwechslers durch die gewünschte Öffnung der Aperturblenze 94 gefädelt. Unterhalb des Detektors 91 wird der Primärelektronenstrahl 82 durch die Magnetfelder 83 und 80 wieder auf die optische Achse gelenkt. Der anschließende Weg ist für die Primärelektronen und die Sekundärelektronen derselbe wie in Fig. 1. Bei dem in Fig. 9 dargestellten Aufbau werden auch die Sekundärelektronen 85 (und Rückstreuelektronen mit geringen Energieverlusten), die längs der optischen Achse durch die Öffnung 77 des unteren Detektors fliegen, durch die Magnetfelder 80 und 83 von der optischen Achse abgelenkt und zum oberen Detektor 91 geleitet.

Der in Fig. 8 und 9 dargestellte zusätzliche obere Detektor 91 kann mit den Ausführungsbeispielen aus Fig. 2 bis Fig. 5 kombiniert werden, sowie mit jedem Korpuskularstrahlgerät, bei dem der primäre Korpuskularstrahl nahe am Rand des Detektors 74 vorbeifliegt (beispielsweise durch eine Öffnung 77 des Detektors) und bei dem zwischen der Probe 11 und dem Detektor 74 ein elektrisches Feld vorhanden ist, das die Sekundärkorpuskeln in Richtung zum Detektor 74 beschleunigt. Die Detektion der Sekundärelektronen bzw. Sekundärkorpuskeln, die am Rand des unteren Detektors 74 vorbei geflogen sind (beispielsweise durch eine Öffnung 77 des Detektors), bewirkt sowohl beim Betrieb mit Gas in der Probenkammer als auch beim Vakuumbetrieb eine Erhöhung der Detektionseffizienz.

Beim Betrieb mit Vakuum in der Probenkammer ohne die Druckstufenblenden 18 und 44 bewirkt der zusätzliche obere Detektor 91 eine starke Verbesserung der Detektionseffizienz, wenn die Sekundärelektronen unter ungünstigen Betriebsbedingungen auf die Öffnung 77 des unteren Detektors fokussiert werden. Weiterhin macht sich die Verbesserung der Detektionseffizienz für die Bildmitte von Bildern mit niedriger Vergrößerung positiv bemerkbar. Bei der Aufnahme von Bildern mit dem unteren Detektor 74 fällt bei niedriger Vergrößerung nämlich ein dunkler Bereich in der Mitte des Bildes auf, der dadurch zustande kommt, daß bei den achsnahen Probenstellen mehr Sekundärelektronen durch die Öffnung 77 des unteren Detektors fliegen als bei den achsfernen Probenstellen. Dieser nachteilige Effekt entfällt, wenn man zum Signal des unteren Detektors 74 das Signal des oberen Detektors 91 hinzuaddiert, das von den Sekundärelektronen stammt, die durch die Öffnung 77 des unteren Detektors geflogen sind. Außerdem bringt der zusätzliche obere Detektor 91 im Vakuumbetrieb ein sehr wertvolles zusätzliches Signal. Es wird insbesondere durch diejenigen Sekundärelektronen erzeugt, die von der Probe unter kleinen Winkeln zur optischen Achse emittiert werden und deshalb vom unteren Detektor 74 nicht detektiert werden können, sondern durch seine Öffnung 77 fliegen. Sie sind für die Untersuchung tiefer Löcher und stark zerklüfteter Strukturen

Eine vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Druck-REMs, die bei großem Abstand zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 eine starke Vergrößerung des Gesichtsfeldes bewirkt, besteht darin, daß statt der Ablenspulen 59 ein Doppelablenkelement verwendet wird. Hiermit kann die Lage des Rasterzentrums auf der optischen Achse frei gewählt werden. Das größtmögliche Gesichtsfeld wird dabei erreicht, wenn um einen Punkt zwischen den beiden Druckstufenblenden 18 und 44 gerastert wird, dessen Lage auf der optischen Achse 79 so gewählt ist, daß das Gesichtsfeld sowohl von der unteren Druckstufenblende 18 als auch von der darüberliegenden Druckstufenblende 44 begrenzt wird.

Für Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Druck-REMs, die bei hohem Druck in der Probenkammer ( $\geq 100$  hPa) oder bei sehr geringen Primärenergien ( $< 1$  keV bei beispielsweise 10 hPa Wasserdampf) arbeiten, entstehen Einschränkungen für den Arbeitsabstand und das Gesichtsfeld dadurch, daß hierfür kleine Abstände ( $< 300 \mu\text{m}$ ) zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 und ein kleiner Durchmesser ( $< 300 \mu\text{m}$ ) der Öffnung 16 zwingend notwendig sind. Berührungen zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 beim Bewegen des Proben-tisches können beim Betrieb mit Gas in der Probenkammer nach Vermessung der Proben-topographie sicher vermieden werden.

Die Einschränkung des Gesichtsfeldes durch die Druckstufenblendenöffnung 16 kann durch die nachfolgend beschriebenen Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Druck-REMs kompensiert werden. Eine bevorzugte Ausgestaltung besteht in der Kombination mit einem computergesteuerten Proben-tisch und einer Bildverarbeitung, die es ermöglicht, mehrere elektronenmikroskopische Einzelbilder zu einem größeren Gesamtbild zusammenzusetzen. Eine weitere bevorzugte Ausgestaltung besteht in der Integration eines Auflichtmikroskopes oder eines konfokalen Lasermikroskopes in die Probenkammer. Hiermit wird vor der Untersuchung mit dem Elektronenstrahl von der bereits auf dem Proben-tisch montierten Probe ein Übersichtsbild aufgenommen und vom Computer gespeichert. In diesem Bild können mit Hilfe des Computers Stellen markiert werden, die dann von dem computergesteuerten Proben-tisch für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung angefahren werden. Solche lichtmikroskopischen Übersichtsbilder machen rasterelektronenmikroskopische Übersichtsbilder im Druck-REM für die meisten Anwendungen überflüssig.

Wenn mit dem Auflichtmikroskop oder dem konfokalen Lasermikroskop gleichzeitig auch noch die Proben-topographie vermessen und vom Computer gespeichert wird, dann kann bei der nachfolgenden Untersuchung mit dem Elektronenstrahl auch der Arbeitsabstand vom Computer ohne zusätzliche Abstandskontrolle eingestellt werden und können beim Bewegen des Proben-tisches Berührungen zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 sicher vermieden werden.



tische Linsen bilden, die zur Fokussierung des Primärelektronenstrahls im elektrischen Feld zwischen der Druckstufenblende (18) und der darüberliegenden Elektrode (44 bzw. 39) bzw. zwischen den darüberliegenden Elektroden (43, 44, 50, 55) eingerichtet sind.

5. Rasterelektronenmikroskop gemäß Anspruch 2 oder 3, bei dem die Elektroden (39, 43, 44, 50, 55) konzentrisch zur optischen Achse des Rasterelektronenmikroskops angeordnet sind.

6. Rasterelektronenmikroskop gemäß einem der Ansprüche 2 bis 5, bei dem die Oberfläche des Detektors (51, 75, 91) zumindest in Teilbereichen auf einem Potential liegt, das gegenüber dem Potential der Probe um mehr als 500 V positiv ist.

7. Rasterelektronenmikroskop gemäß einem der Ansprüche 2 bis 5, bei dem die Oberfläche des Detektors (51, 75, 91) zumindest in Teilbereichen auf einem Potential liegt, das gegenüber dem Potential der Probe um mehr als 1000 V positiv ist.

8. Rasterelektronenmikroskop gemäß einem der Ansprüche 2 bis 7, bei dem eine kombinierte elektrostatische und magnetische Objektivlinse vorgesehen ist.

9. Rasterelektronenmikroskop gemäß einem der Ansprüche 2 bis 8, bei dem eine oder mehrere Elektroden (39, 44) oberhalb der Druckstufenblende (18) weitere Druckstufenblenden bilden, wobei Pumpeinrichtungen zur Erzeugung von Unterdrücken in den Zwischenräumen zwischen den Druckstufenblenden vorgesehen sind.

10. Rasterelektronenmikroskop gemäß Anspruch 9, bei dem die als Druckstufenblenden gestalteten Elektroden Öffnungen besitzen, die eine charakteristische Dimension von weniger als 1500 µm besitzen.

11. Rasterelektronenmikroskop gemäß einem der Ansprüche 2 bis 10, bei dem ein Komponentenaufbau vorgesehen ist, wobei die zum Mikroskopbetrieb bei erhöhtem Druck in der Probenkammer erforderlichen Bauteile (13, 18, 19, 31, 32, 39, 40, 42-44, 60, 63, 65, 68, 69) eine oder mehrere leicht demontierbare Baugruppen in der Probenkammer bilden.

12. Rasterelektronenmikroskop gemäß Anspruch 2, bei dem ein erster Detektor (74) mit seinem äußeren Rand oder einer inneren Öffnung (77) an den Primärelektronenstrahl angrenzend angeordnet und ein zweiter Detektor (91) vorgesehen ist, der in Bezug auf die Bewegungsrichtung

20. Rasterelektronenmikroskop gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem eine Gegenelektrode (78) dazu eingerichtet ist, die Sekundärelektronen abzubremesen und dadurch den Transport der Sekundärelektronen zum Detektor (51) zu unterstützen.
21. Rasterelektronenmikroskop gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein Detektor für energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) zum Betrieb bei Abständen von weniger als 1,5 mm zwischen der Probe (11) und der untersten Druckstufenblende (18) vorgesehen ist.
22. Verwendung eines Rasterelektronenmikroskops gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche zur Aufnahme rasterelektronenmikroskopischer Abbildungen von Proben in einer Probenkammer unter erhöhtem Druck.



Fig. 5

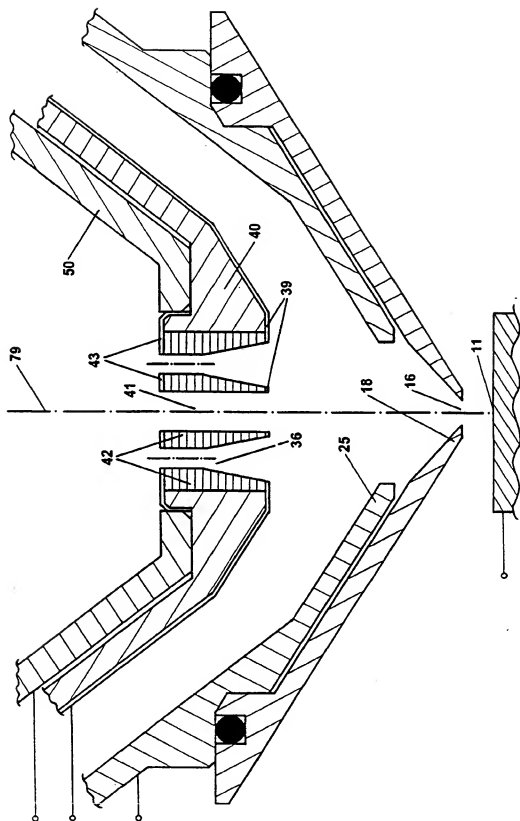
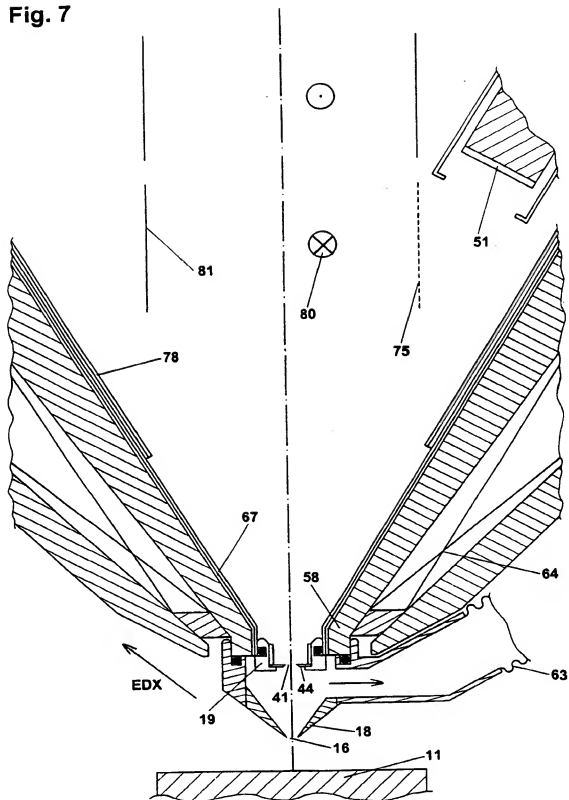
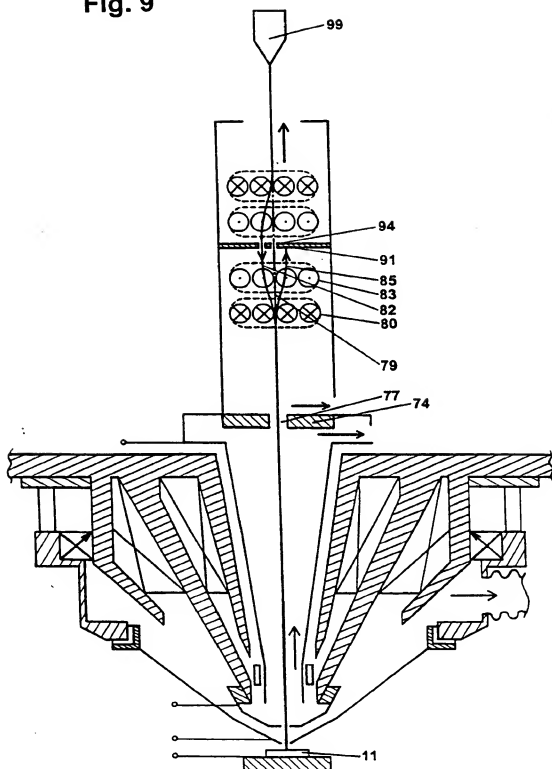


Fig. 7



8/8

Fig. 9



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Inter national Application No

PCT/EP 99/01544

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No
A	EP 0 817 235 A (HITACHI LTD) 7 January 1998 (1998-01-07) cited in the application abstract; figures -----	1

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Inter. nationales Aktenzeichen

PC1/EP 99/01544

**A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES**  
IPK 6 H01J37/28 H01J37/244

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
IPK 6 H01J

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehorende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	WO 97 07526 A (PHILIPS ELECTRONICS NA) 27. Februar 1997 (1997-02-27) Seite 21, Zeile 20 - Seite 22, Zeile 33; Abbildungen	1, 2, 5
A	US 5 362 964 A (KNOWLES W RALPH ET AL) 8. November 1994 (1994-11-08) Spalte 7, Zeile 10 - Spalte 10, Zeile 20; Abbildungen 6-8	1, 2, 5
A	US 5 677 531 A (MIYAZAKI YASUMICHI) 14. Oktober 1997 (1997-10-14) Spalte 3, Zeile 1 - Spalte 4, Zeile 46; Abbildungen 1-3	1
	--- -/-	



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfindnerischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfindnerischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"Z" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

26. Juli 1999

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

03/08/1999

Name und Postenschrift der Internationalen Recherchenbehörde  
Europäisches Patentamt, P.B. 5618 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Beauftragter

Schaub, G



# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Inter- nales Aktenzeichen

PCT/EP 99/01544

Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 9707526 A	27-02-1997	EP 0788653 A	13-08-1997
US 5362964 A	08-11-1994	EP 0753200 A	15-01-1997
		EP 0924743 A	23-06-1999
		JP 9501010 T	28-01-1997
		WO 9504367 A	09-02-1995
		US 5412211 A	02-05-1995
US 5677531 A	14-10-1997	JP 9050780 A	18-02-1997
		JP 9199070 A	31-07-1997
EP 0817235 A	07-01-1998	JP 6132002 A	13-05-1994
		DE 69317847 D	14-05-1998
		DE 69317847 T	03-12-1998
		EP 0592899 A	20-04-1994
		US 5387793 A	07-02-1995